

Estimation stochastique d'un écoulement décollé en aval d'une bosse par méthode électrochimique

A.Graziani^{a,c}, F.Fadla^a, M.Lippert^a, F.Kerhervé^b, R.Mathis^b, D.Uystepruyst^a,
L.Keirsbulck^a

a. LAMIH CNRS UMR 8201, F-59313 Valenciennes, France (marc.lippert@unic-valenciennes.fr,
laurent.keirsbulck@univ-valenciennes.fr, david.uystepruyst@univ-valenciennes.fr,
fawzi.fadla@univ-valenciennes.fr)

b. LML CNRS UMR 8107, F-59650 Villeneuve d'Ascq, France (franck.kerherve@ec-lille.fr,
romain.mathis@univ-lille1.fr)

c. Institut de Recherche Technologique Railenium, F-59300, Famars, France
(anthony.graziani@railenium.eu)

Résumé :

L'objectif de cette communication est de mettre en avant le potentiel de la méthode électrochimique, en tant que méthode expérimentale, pour reconstruire la dynamique temporelle du champ de vitesse associé à un écoulement décollé en aval d'un corps profilé par le biais de traitements stochastiques. Pour cela, des mesures simultanées de frottement pariétal multipoint (obtenues par méthode électrochimique) à des fréquences résolvant la dynamique de l'écoulement et de champs de vitesse (obtenus par PIV) non résolus en temps, ont été réalisées dans la zone de recirculation en aval d'un obstacle 2D profilé. Le nombre de Reynolds considéré, basé sur la hauteur de l'obstacle, est de $Re_h = 580$. Cette étude montre que le frottement instationnaire peut être utilisé avantageusement (en lieu et place de prises de pression instationnaires par exemple) en tant qu'observables pour procéder à une estimation stochastique du champ de vitesse. L'un des avantages majeurs est que le frottement pariétal se raccorde asymptotiquement au champ de vitesse contrairement à la pression. De part la reconstruction mise en oeuvre, cette étude permet également de souligner le phénomène de battement du bulbe décollé.

Abstract :

The objective of the present work is to highlight the capability of the electrochemical method to stochastically estimate the time-resolved instantaneous velocity field of a separated flow downstream of a shaped body. For this, synchronised measurements between the wall-shear stress and the velocity field have been undertaken. The instantaneous velocity field is obtained from standard PIV measurements. The time-resolved wall-shear stress, measured using the electrochemical method from distributed streamwise locations within the recirculation region, is used as observer for the stochastic estimation. The considered Reynolds number based on the obstacle's height h and the upstream freestream velocity U_b is $Re_h = 580$. A benefit of this method compared to pressure sensors commonly used is the continuity between the wall-shear stress and the velocity field at the wall boundary. The efficiency of this method to reconstruct the unsteady velocity field has, in particular, allows us to emphasise the flapping phenomenon of the separation bubble.

Mots clefs : Méthode électrochimique, estimation stochastique, décollement, obstacle profilé.

1 Introduction

L'analyse des phénomènes d'interaction fluide/paroi revêt un intérêt considérable tant d'un point de vue académique qu'industriel. Leur étude devient particulièrement complexe lorsque les géométries étudiées engendrent des gradients de pression adverse ou mettent en jeu des ruptures de pente qui conduisent au décollement de la couche limite. Ceci induit de fortes instationnarités ainsi que des phénomènes basses fréquences

(c.à.d battement de la zone de recirculation) pouvant mener par exemple à la formation de charges aérodynamiques intenses. La caractérisation de ces interactions devient particulièrement problématique lorsque les vitesses d'écoulement mises en jeu sont suffisamment fortes (c'est-à-dire en écoulement turbulent), car dans ce cas les phénomènes mis en jeu sont très rapides et demandent des moyens d'essais (PIV résolus en temps "TR-PIV") et de calcul (DNS) adaptés et donc très coûteux à mettre en œuvre. Depuis une quarantaine d'années, une part importante des travaux de recherche a été consacrée au développement d'outils d'analyse adaptés à ce contexte. A ce titre, on peut citer les méthodes d'analyses stochastiques, dont la paternité revient à Adrian ([16], [17]), qui a utilisé l'estimation stochastique linéaire (LSE) dès 1976 en vue de caractériser les structures cohérentes en écoulement turbulent. L'application des méthodes stochastiques pour l'analyse des couplages fluide/paroi a depuis été étudiée en tant qu'alternative à la mise en place de moyens d'essai ou de calculs lourds. La méthode d'estimation par LSE consiste à reconstituer une grandeur dite conditionnelle à partir d'un nombre fini d'observations. On peut citer à titre d'exemple les reconstructions par LSE/QSE (estimation stochastique linéaire/quadratique) du champ de vitesse conditionné par des mesures de pression pariétales réalisées par Hudy [9] sur une configuration de marche descendante. Les mesures synchronisées caractérisant le couplage pression/vitesse (Microphones/PIV) sont majoritairement utilisées dans la littérature car elles permettent entre autres de mieux identifier les phénomènes tourbillonnaires responsables de la génération des fluctuations de pression pariétale, mais également de prévoir les fluctuations de pression pariétale liées au champ aérodynamique et ainsi de pouvoir détecter les mouvements tourbillonnaires via leurs signatures pariétales (application au contrôle des écoulements turbulents). Cependant, l'utilisation de sondes de pression en tant qu'observables nécessite d'inclure les termes quadratiques (QSE), c'est à dire de prendre en compte des termes sources linéaires et non-linéaires en vue d'obtenir une représentation suffisamment précise du champ de vitesse reconstitué ([19],[18]).

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'efficacité des sondes électrochimiques [1] permettant la mesure du frottement instationnaire en tant qu'observable pour la reconstruction stochastique. Ces dernières présentent l'avantage, par rapport aux sondes de pression, de se raccorder asymptotiquement à la paroi avec le champ de vitesse. A notre connaissance, la méthode électrochimique n'a jamais été utilisée dans ce but. Les phénomènes instationnaires, très complexes, induit par un décollement de couche limite ont fait l'objet de nombreuses études numériques ces dernières années ([10], [14], [12]), mais cependant on dénombre très peu d'études expérimentales sur le sujet ([15], [13], [11]). Ce dernier constat s'explique par la dynamique rapide du phénomène, difficilement mesurable à l'aide des méthodes d'acquisition standards. Cette communication présente les premiers résultats de l'estimation stochastique de l'écoulement décollé par le biais de mesures de frottement instationnaire obtenues par méthode électrochimique.

2 Configuration géométrique et méthode expérimentale

Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés par Fadla [7], qui ont permis de caractériser expérimentalement la dynamique instationnaire très riche du décollement induit par un obstacle 2D profilé. Cette configuration d'écoulement décollé est typique de ceux apparaissant classiquement sur des profils d'ailerons de forte incidence. L'obstacle 2D est placé dans la veine d'essai en plexiglass du canal hydrodynamique polarographique du LAMIH à une distance de $62.5H$ de l'entrée du canal de hauteur $2H$ (FIGURE 1).

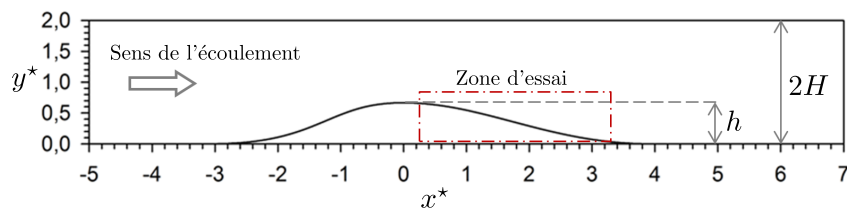


Figure 1: Configuration étudiée et position de la zone d'essai. Le symbole \star fait référence à l'adimensionnement par rapport à la demi-hauteur H du canal.

L'écoulement amont est de type canal plan non perturbé et la hauteur de l'obstacle 2D, assimilable à une bosse, est de $h = 6.7$ mm et la largeur ($7.5H$) s'étend jusqu'aux parois latérales du canal pour en assurer la

bidimensionnalité. Le banc d'essais a été conçu pour travailler à vitesse modérée, et offre une faible intensité de turbulence dans la veine. La vitesse débitante d'étude est de $U_b = 0,1$ m/s, ce qui correspond à un nombre de Reynolds, basé sur la hauteur de bosse, de $Re_h = 580$. Dans cette configuration d'écoulement, la zone de recirculation se formant en aval de la bosse recolle à une distance adimensionnée, par rapport à la demi-hauteur du canal, $L_{R^*} = 6$ par rapport à son sommet. Le système de coordonnées choisi dans cette étude est tel que l'axe x correspond à la direction de l'écoulement, tandis que l'axe y lui est directement perpendiculaire (Cf. [FIGURE 1](#)). Les composantes du vecteur vitesse dans ce repère seront notées u et v respectivement. Les mesures ont été réalisées dans la partie décollée de l'écoulement, dans le plan médian du canal, directement en aval du sommet de l'obstacle. Les mesures de champ des vecteurs vitesses ont été réalisées à l'aide d'un système PIV de marque TSI, incluant une caméra POWERVIEW, de résolution 2048×2048 , équipée d'une lentille NIKKOR de 105 mm, ainsi qu'un laser QUANTEL BSLT220, fonctionnant à une longueur de 532 nm et pouvant atteindre une puissance de 220 mJ à une fréquence maximale de 7Hz. Le logiciel INSIGHT 4G développé par TSI a été utilisé pour l'acquisition et le post-traitement des images PIV. L'acquisition des champs a été effectuée sur une durée d'une heure à une fréquence $(f_s)_{PIV} = 1$ Hz, pour un total de 3600 champs de vitesses instantanés. L'écoulement a étéensemencé avec des particules d'Iridin d'environ $10\mu\text{m}$ de diamètre moyen. L'ensemble des paramètres d'essai est résumé dans le [TABLE 1](#). Des essais de PIV rapide ont été également réalisés en vue de mettre en évidence le raccordement asymptotique du frottement instationnaire au champ de vitesse. Pour cela une caméra rapide MIRO310, de résolution 1280×800 a été utilisée avec un laser continu de type Quantum Excel.

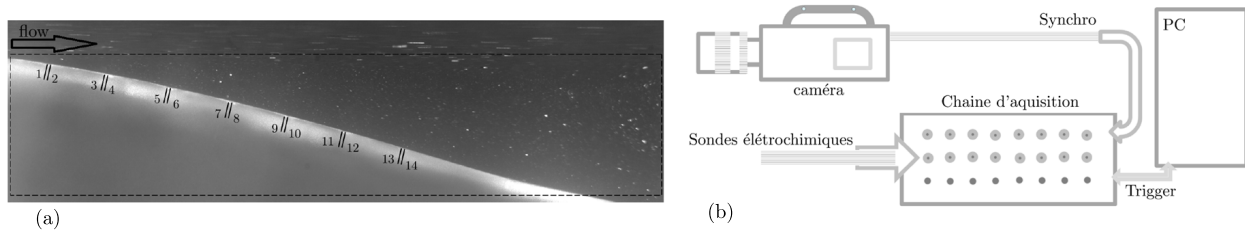


Figure 2: (a) Positions des sondes électrochimiques vis-à-vis du plan PIV, (b) Chaîne d'acquisition utilisée en vue du couplage vitesse/frottement

Les signaux temporels du frottement pariétal sont obtenus par méthode électrochimique (voir [\[1\]](#), [\[2\]](#) et [\[4\]](#) pour plus de détails). Cette méthode expérimentale, basée sur la mesure d'un courant limite de diffusion à la surface des sondes, s'avère très intéressante pour l'étude des écoulements turbulents confinés [\[6\]](#). Le frottement pariétal a été mesuré à l'aide de sondes rectangulaires, de longueur $l = 0.1\text{mm}$ sur une largeur de 0.5mm , placées à différentes positions sur la surface de l'obstacle, dans son plan central. Sept paires de sondes ont été utilisées, elles sont espacées de 5mm les unes des autres. Les sondes d'une même paire sont isolées par une feuille de mylar de 0.02mm dans le but de déterminer le signe du frottement pariétal dans la zone de recirculation ([FIGURE 2a](#)). La solution électrochimique utilisée dans cette étude est un mélange d'une solution acqueuse de ferri-ferrocyanide de potassium et de sulfate de potassium, dont les concentrations respectives sont $C_0 = 10 \text{ mol/m}^3$ et 240 mol/m^3 , (concentrations précédemment utilisés dans d'autres études [\[6\]](#), [\[5\]](#)). Le courant limite de diffusion a été converti en tension utilisant un convertisseur courant-tension DEWESOFT ($4 - 20\text{mA}$), et acquis grâce à un système d'acquisition DEWESOFT incluant un convertisseur analogique-numérique 12-bit. Ce système est constitué d'une baie d'acquisition type SIRIUS-8STG M PLUS, contenant deux fois 8 ports, ainsi qu'une entrée supplémentaire pour la synchronisation avec les autres systèmes d'acquisition. Chaque port d'entrée est configurable individuellement. Les signaux ont été échantillonnés à une fréquence $(f_s)_{Pol} = 1\text{kHz}$ pour assurer un signal suffisamment résolu en temps, et filtré (Bessel d'ordre 8 et de fréquence de coupure de 30Hz). Dans le but de prendre en compte le décalage temporel et l'atténuation d'amplitude générale du frottement pariétal mesuré, une méthode de correction, introduite par [Sobolik et al. \[3\]](#), a été utilisée. Cette méthode conduit à l'expression générale du frottement pariétal temporel corrigé, $\tau(t)$:

$$\tau(t) = \tau_q(t) + \frac{2}{3}T_0(t)\left(\frac{\partial\tau_q(t)}{\partial t}\right) \quad (1)$$

Avec τ_q le frottement quasi-stationnaire [\[8\]](#), i.e. $\tau_q(t) = 3.22\mu(n_e.\mathfrak{F}.C_0)^{-3}\mathfrak{D}^{-2}l^{-5}I_{lim}^3(t)$, avec n_e le

nombre d'électrons intervenant dans la réaction d'oxydo-réduction, I_{lim} le courant limite de diffusion et \mathfrak{F} la constante de Faraday. Le paramètre T_0 est défini par : $T_0(t) = 0.426l^{2/3}\mathfrak{D}^{-1/3}\tau_q(t)$ où \mathfrak{D} est le coefficient de diffusion de l'espèce active de la solution. Le couplage des deux méthodes de mesure a été réalisé à l'aide d'un trigger externe, permettant de démarrer et d'arrêter les acquisitions au même instant (Cf [FIGURE 2b](#)). L'acquisition démarre lorsque le signal trigger dépasse 50% de son amplitude maximale sur son front montant, et inversement s'arrête lorsque le signal passe sous les 50% de son amplitude maximale sur le front descendant.

3 Ecoulement moyen et raccordement asymptotique à la paroi

Dans un premier temps, nous avons caractérisé globalement l'écoulement décollé. La [FIGURE 3](#), représentant le champ moyen de vitesse en aval de l'obstacle, laisse clairement apparaître deux zones d'écoulement bien distinctes; l'écoulement libre et la zone de recirculation. Ces deux zones sont toute deux séparées par une couche de cisaillement et on peut également évaluer la position du point de décollement moyen qui est situé à environ $x^* \approx 0.5$.

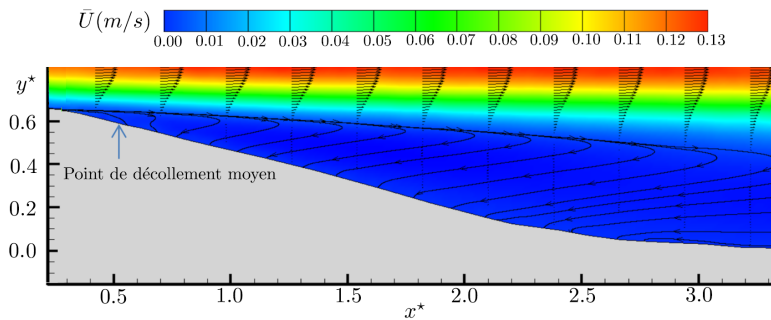


Figure 3: Champ de vitesse moyen sur 3600 images PIV. Les lignes de courants représentent la zone de recirculation moyenne formée en aval du profil.

L'intérêt de la méthode électrochimique en temps qu'observable pour les méthodes stochastiques, réside dans le fait qu'elle permet une mesure direct du frottement pariétal, et que celui-ci admet un raccordement asymptotique avec le champ de vitesse à la paroi :

$$\tau(t) = \mu \left(\frac{\partial u_\theta(t)}{\partial y} \right)_{y=0}, \quad (2)$$

où u_θ désigne la vitesse tangentielle à la paroi de l'obstacle. Cette propriété, que la pression ne possède pas, accroît les corrélations entre observables et champs de vitesse, qui sont à la base de la reconstruction stochastique. Afin de mettre en avant cette propriété et également en vue de vérifier la qualité de nos mesures électrochimiques, nous avons effectué des mesures couplées en utilisant une camera rapide (MIRO310) sur un temps nettement plus court (10s) que celui acquit avec le système PIV "Standard".

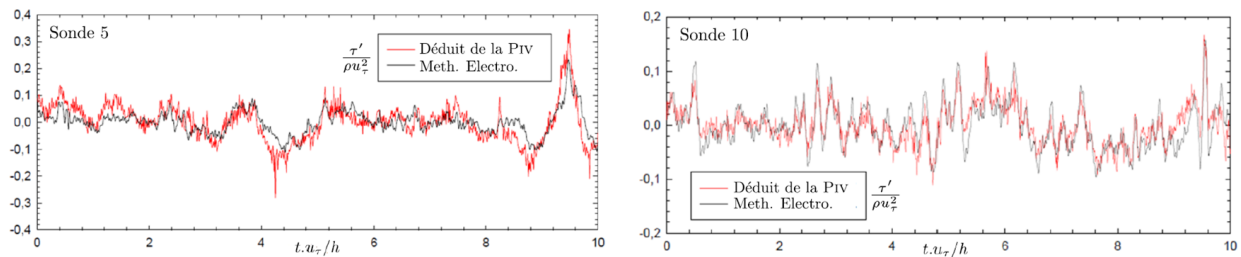


Figure 4: Comparaison des fluctuations de frottement pariétal obtenues par méthode électrochimique avec celles déduites des champs fluctuants PIV, pour les sondes 5 et 10 respectivement aux positions $x^* = 0.72$ et $x^* = 1.15$.

L'objectif étant de montrer que l'on observe une très bonne concordance entre le frottement instationnaire déduit des mesures PIV haute cadence et celui obtenu par méthode électrochimique, le frottement est déduit

en extrayant à partir des clichés PIV la fluctuation de vitesse très proche de la paroi perpendiculairement à la positions des sondes, selon l'approximation suivante:

$$\tau'(t) \approx \mu u'_\theta(y_n, t) / \Delta y_n \quad (3)$$

où $u'_\theta = u' \cos(\theta) + v' \sin(\theta)$ est la vitesse tangentielle à la paroi du profile, θ l'angle entre la direction de l'écoulement et la tangente à la paroi, et y_n la normale à la paroi du profile. La [FIGURE 4](#) représente les fluctuations du frottement mesurées via la méthode électrochimique et celles déduites des clichés de la PIV rapide, pour deux sondes arbitrairement choisies, positionnées en $x^* = 0.72$ et $x^* = 1.15$. Les courbes montrent une forte corrélation entre les deux signaux, ce qui permet de mettre en évidence à la fois la qualité des mesures de frottement obtenues par méthode électrochimique, et de souligner le niveau élevé de corrélation attendu entre le frottement pariétal instationnaire et le champs de vitesse nécessaire à la réalisation d'une LSE.

4 Estimation stochastique

Le paragraphe précédent a permis de mettre en évidence, pour le nombre de Reynolds étudié, la capacité de la méthode électrochimique a restituer correctement le frottement instationnaire sans aucun déphasage. L'objectif est maintenant de montrer que le frottement instationnaire obtenu par méthode électrochimique peut être employé en tant que signal conditionneur pour estimer le champ de vitesse même loin de la paroi. Pour cela nous allons considérer l'ensemble des sondes électrochimiques en tant qu'observables en vue d'estimer la dynamique complète du champs de vitesse. D'une façon générale, la LSE peut être considérée comme une approximation linéaire de la moyenne conditionnelle d'une quantité. Dans cette étude, la quantité à estimer est le champ de vecteurs vitesses compris entre deux clichés fluctuants PIV $\{\mathbf{u}'(\mathbf{x}, t_i)\}_{i=1, \dots, M}$, connaissant l'évolution du frottement pariétal dont les 14 sondes forment le set d'observables, notés $\tau'(x_j, t)_{j=1, \dots, N_s}$. L'estimation linéaire du champ fluctuant $u'(x, t)$ s'écrit :

$$\tilde{\mathbf{u}}'(\mathbf{x}_i, t) = \sum_{j=1}^{N_s} \alpha_j(\mathbf{x}_i) \tau'(\mathbf{y}_j, t) \quad (4)$$

où $\alpha_j(\mathbf{x}_i)$ désigne un jeu de coefficient à identifier pour le point x_i et $\tau'(\mathbf{y}_j, t)$ la fluctuation du frottement pariétal de la sonde j , au point y_j à l'instant t . Les coefficients $\alpha_j(\mathbf{x}_i)$ sont déterminés en minimisant l'erreur quadratique entre la valeur réelle et la valeur estimée :

$$J = \|\tilde{\mathbf{u}}'(\mathbf{x}, t) - \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t)\|_2^2 \quad (5)$$

La minimisation de cette erreur conduit à la résolution d'un système linéaire du type $A\Lambda = B$, où $\Lambda_{ij} = \alpha_j(\mathbf{x}_i)$ est la matrice des coefficients stochastiques, $A_{ij} = \overline{\tau'(y_j, t) \tau'(y_i, t)}$ est une matrice carrée symétrique réelle, contenant les corrélations croisées entre observables, et $B_{ij} = \overline{u'(\mathbf{x}_j, t) \tau'(y_i, t)}$ est une matrice contenant les corrélations entre le champ de vitesses et les observables. La qualité de l'estimation dépend intrinsèquement des niveaux de corrélations obtenus dans B_{ij} . Bien que non reportés, des maximums de corrélation d'environ 50% sont ici rencontrés. A titre d'exemple, la [FIGURE 5](#), montre le champ de vitesses fluctuantes u' , issue d'un image PIV à un instant donné ainsi que le champ reconstruit par la méthode LSE.

L'amplitude des fluctuations est globalement plus faible. En revanche, la dynamique dans la zone de recirculation (fortement corrélée avec le frottement instationnaire à la paroi) est globalement bien reproduite. En particulier, la dynamique de battement de la couche de cisaillement est bien reproduite comme l'illustre la [FIGURE 6](#). Ici, seules les 6 premières sondes amont sont prises en compte pour l'estimation. L'analyse spectrale du champ reconstruit met effectivement en évidence la fréquence caractéristique de l'instabilité de battement ($St = 0.12$) en accord avec des études préalables [\[20\]](#).

Ces résultats montrent ainsi le fort potentiel des sondes électrochimiques pour une estimation en temps-réel du champ de vitesse et en particulier des modes d'instabilités spécifiques jouant un rôle primordiale dans la dynamique du décollement.

5 Conclusion

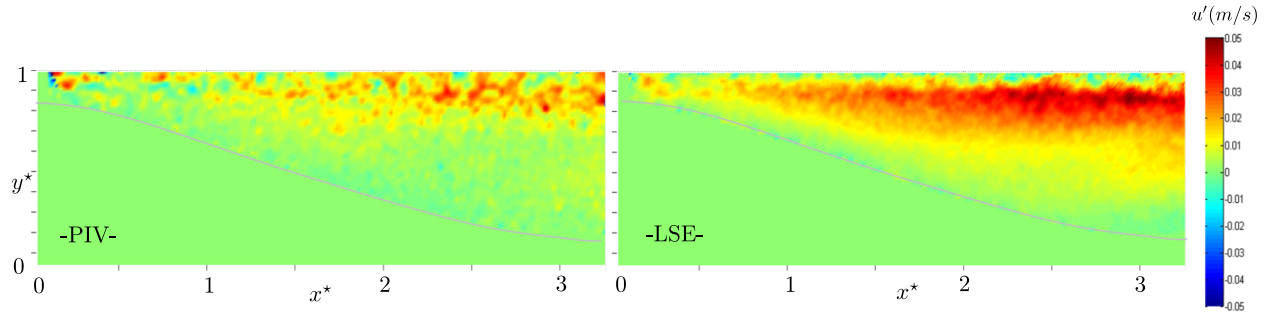


Figure 5: Champ de vitesses fluctuantes u' à $t = 1364s$, issue d'une image PIV à cet instant, et reconstruit par méthode LSE.

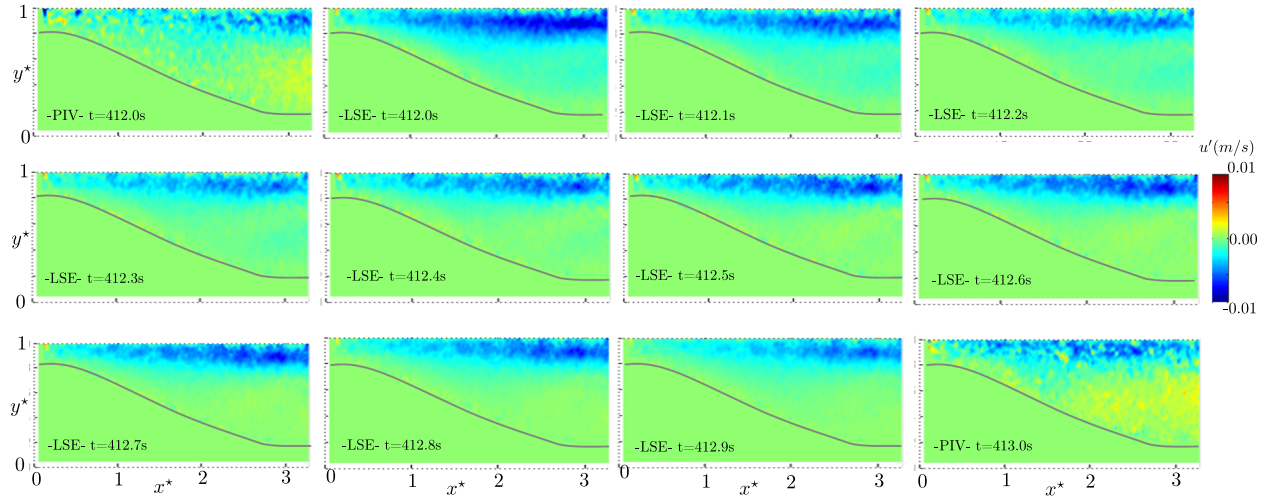


Figure 6: Reconstruction de la dynamique de battement de la couche de cisaillement, sur 10 images, entre les instants $t = 412s$ et $413s$.

Cette étude a permis la validation de la méthode électrochimique en tant qu'observable pour la reconstruction stochastique du champ de vitesse dans la région de recirculation. Cette dernière apparaît être une alternative plus efficace et moins contraignante que l'utilisation de mesures de pressions pariétales. En effet, dans la plupart des études utilisant la pression pariétale instationnaire, il est souvent nécessaire d'utiliser une méthode stochastique d'ordre plus élevé (quadratique) afin d'obtenir une reconstitution satisfaisante de l'écoulement considéré. L'utilisation de sondes de frottement électrochimiques permet de se limiter à une estimation stochastique linéaire, moins complexe à mettre en oeuvre, de part le raccordement asymptotique à la paroi reliant le frottement à la vitesse longitudinale.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le Campus International pour la Sécurité et l'Intermodalité des Transports (CISIT), la Région Nord-Pas-de-Calais, l'Union Européenne, la Direction de la Recherche. Les auteurs de ce document remercient sincèrement ces institutions pour leurs soutiens.

References

- [1] Z. Mao and T.J. Hanratty, 1991. *Analysis of wall shear stress probes in large amplitude unsteady flows*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.34, pp.281-290.
- [2] Z. Mao and T.J. Hanratty, 1992. *Measurement of wall shear rate in large amplitude unsteady flows*. Exp. Fluids, Vol.12, pp.342-350.

- [3] V. Sobolik, P. Mitschka and T. Menzel, 1986. *Method of manufacture of segmented probe with circular cross-section*. Czechoslovak Pat. A0, pp.262-823.
- [4] A. Ambari, C. Deslouis and B. Tribollet, 1985. *Frequency response of mass transfer rate in a modulated flow at electrochemical probes*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.29, pp.35-45.
- [5] J. Tihon, J. Legrand and P. Legentilhomme, 1995. *Dynamics of electrodiffusion probes in developing annular flows*. Exp. Fluids, Vol.20(2), pp.131-134.
- [6] L. Keirsbulck, L. Labraga and M. Gad-el-Hak, 2012. *Statistical properties of wall-shear-stress fluctuations in turbulent channel flows*. Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.37, pp.1-12.
- [7] F. Fadla, L. Keirsbulck, J-P. Laval and L. Labraga, 2013. *Caractérisation expérimentale du décollement instationnaire autour d'un obstacle 2D*. 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux 26-30 Août
- [8] M.A. Lévêque, 1928. Ann. Mines, Vol.13, pp.381-412.
- [9] L.M. Hudy, A.M. Naguib, and W.M. Humphreys, 2007. *Stochastic estimation of a separated-flow field using wall-pressure-array measurements*. Phys. Fluids, Vol.19.
- [10] Dandois, J., Garnier, E., Sagaut, P. 2007 Numerical simulation of active separation control by a synthetic jet. J. Fluid Mech., Vol.574, pp.25-58
- [11] Song, S., Degraaff, D.B., Eaton, J.K. 2000 Experimental study of a separating, reattaching, and redeveloping flow over a smoothly contoured ramp. Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.21, pp.512-519
- [12] Xiaohua, W., Squires, K. 1998 Numerical investigation of the turbulent boundary layer over a bump. J. Fluid Mech., Vol.362, pp.229-271
- [13] Loureiro, J.B.R., Pinho, F.T., Silva Freire, A.P. 2007 Near wall characterization of the flow over a two-dimensional steep smooth hill. Exp. Fluids, Vol.42, pp.441-457
- [14] Marquillie, M., Ehrenstein, U. 2001 Etude numérique de l'instabilité globale et locale d'un écoulement de couche limite décollé. 15ème Congrès Français de Mécanique, Nancy 3-7 Septembre
- [15] Boujo, E., Gallaire, F. 2011 Etude expérimentale de l'écoulement derrière une bosse. 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon 29 Août-2 Septembre
- [16] Adrian, J.R. 1977 On the Role of Conditional Averages in Turbulence Theory. *Symposium on turbulence in liquids*, pp.323-332
- [17] Adrian, J.R. 1979 Conditional eddies in isotropic turbulence. *Phys. Fluids*, Vol.22(11), pp.2065-2070
- [18] Pinier, J.T., Ausseur, J.M., Glauser, M.N. 2007 Proportional closed-loop feedback control of flow separation. AIAA J., Vol.45(1)
- [19] Murray, N.E., Ukeiley, L.S. 2007 Modified quadratic stochastic estimation of resonating subsonic cavity flow. J. Turbul., 8(53)
- [20] Fadla 2014 Caractérisation expérimentale de la dynamique du décollement de couche limite induit par un gradient de pression adverse et une effet de courbure. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, September.